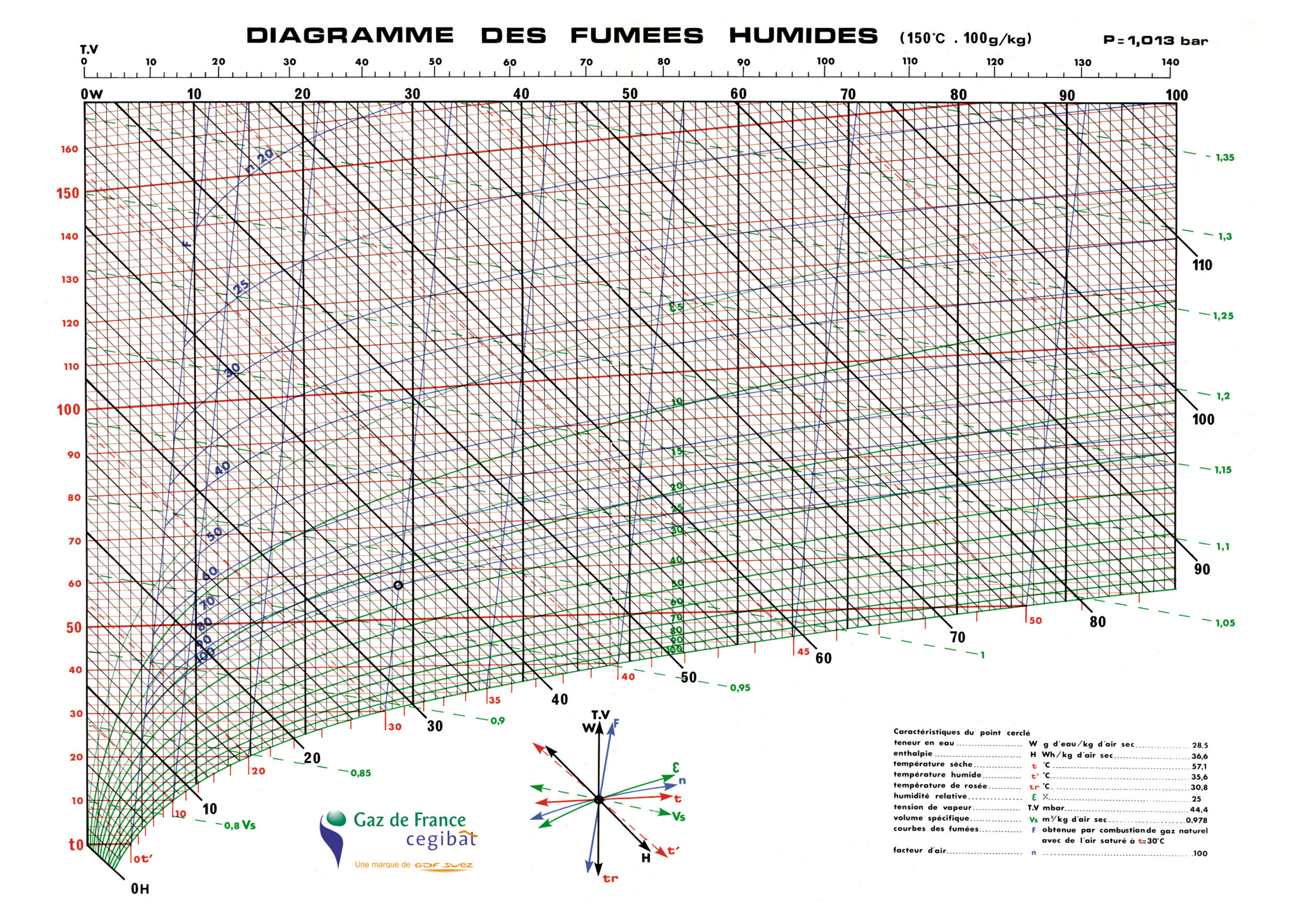


DIAGRAMME DES FUMEES HUMIDES (150°C . 100g/kg)
P = 1,013 bar
T.V
0W 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
t0
0t'
0H
0,8 Vs
0,85
0,9
0,95
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3
1,35
Caractéristiques du point cerclé
teneur en eau .... W g d'eau/kg d'air sec 28,5
enthalpie .... H Wh/kg d'air sec 36,6
température sèche .... t °C 57,1
température humide .... t' °C 35,6
température de rosée .... tr °C 30,8
humidité relative .... ε % 25
tension de vapeur .... T.V mbar 44,4
volume spécifique .... Vs m³/kg d'air sec 0,978
courbes des fumées .... F obtenue par combustion de gaz naturel avec de l'air saturé à t=30°C
facteur d'air .... n 100
Gaz de France
cegibat
Une marque de GDF SUEZ

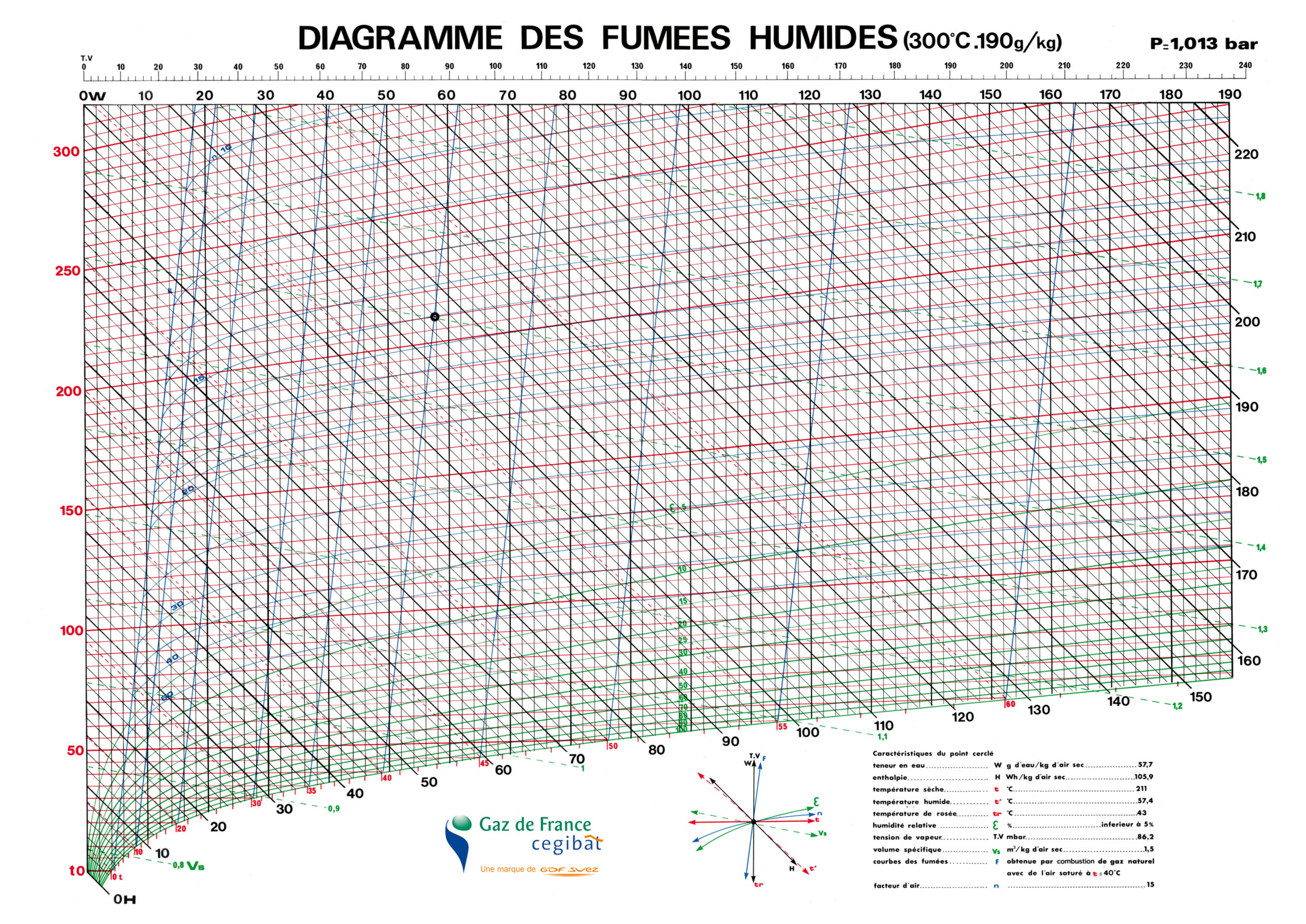


DIAGRAMME DES FUMEES HUMIDES (300°C.190g/kg)
P=1,013 bar
T.V
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240
0W 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190
300
250
200
150
100
50
t0
0H
220
210
200
190
180
170
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
1,8
1,7
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1
0,9
0,8 Vs
Gaz de France
cegibat
Une marque de GDF SUEZ
Caractéristiques du point cerclé
teneur en eau .... W g d'eau/kg d'air sec 57,7
enthalpie .... H Wh/kg d'air sec 105,9
température sèche .... t °C 211
température humide .... t' °C 57,4
température de rosée .... tr °C 43
humidité relative .... ε % .... inferieur à 5%
tension de vapeur .... T.V mbar 86,2
volume spécifique .... Vs m³/kg d'air sec 1,5
courbes des fumées .... F obtenue par combustion de gaz naturel avec de l'air saturé à t = 40°C
facteur d'air .... n 15

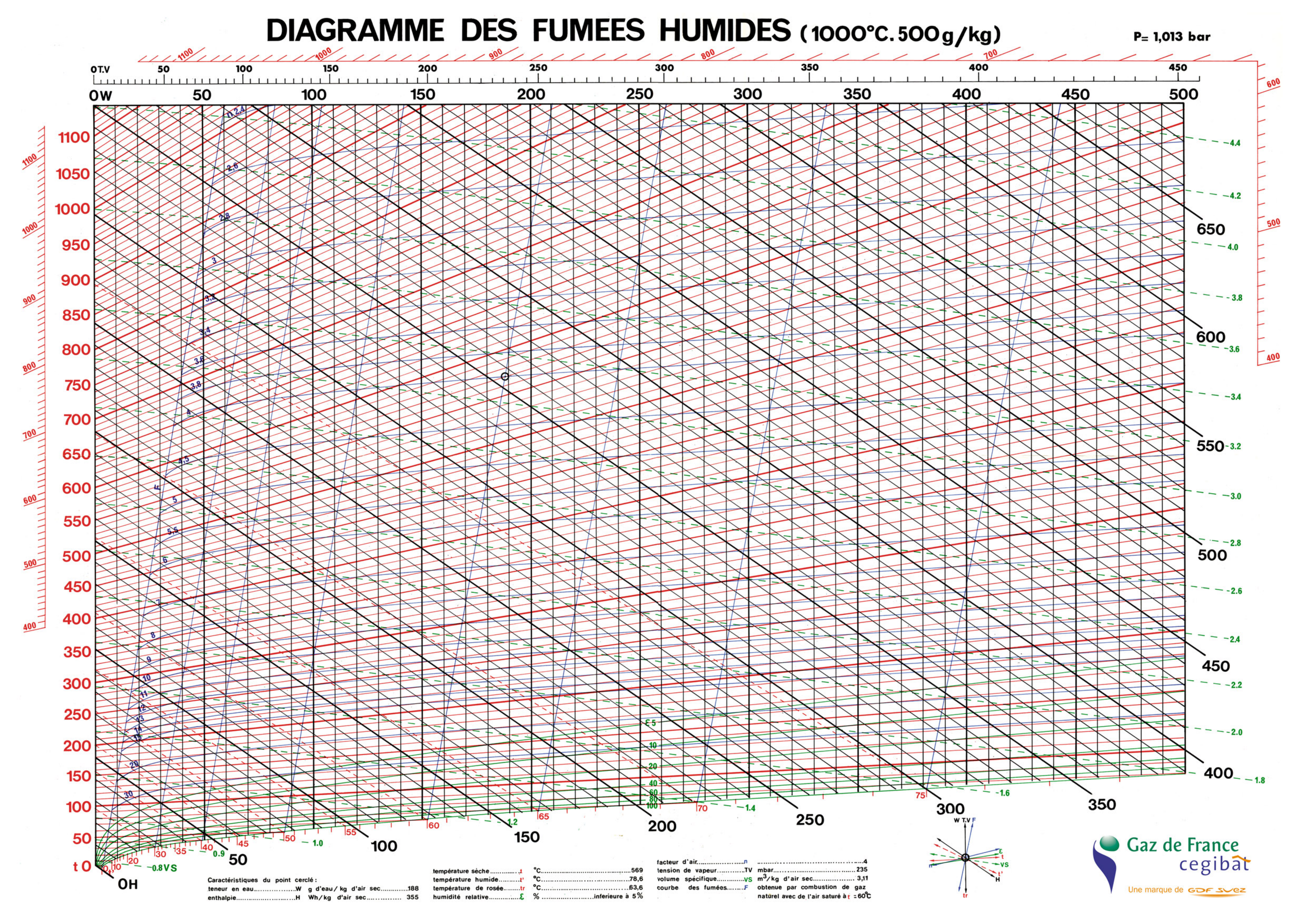


DIAGRAMME DES FUMEES HUMIDES (1000°C. 500 g/kg)
P= 1,013 bar
OT.V
0W
0H
t 0
Caractéristiques du point cerclé :
teneur en eau.....W g d'eau / kg d'air sec.....188
enthalpie.....H Wh/kg d'air sec..... 355
température sèche.....t °C.....569
température humide.....t' °C.....78,6
température de rosée.....tr °C.....63,6
humidité relative.....ε %.....inferieure à 5%
facteur d'air.....n 4
tension de vapeur.....TV mbar.....235
volume spécifique.....VS m3/kg d'air sec..... 3,11
courbe des fumées.....F obtenue par combustion de gaz naturel avec de l'air saturé à t =60°C
Gaz de France
cegibat
Une marque de GDF SUEZ

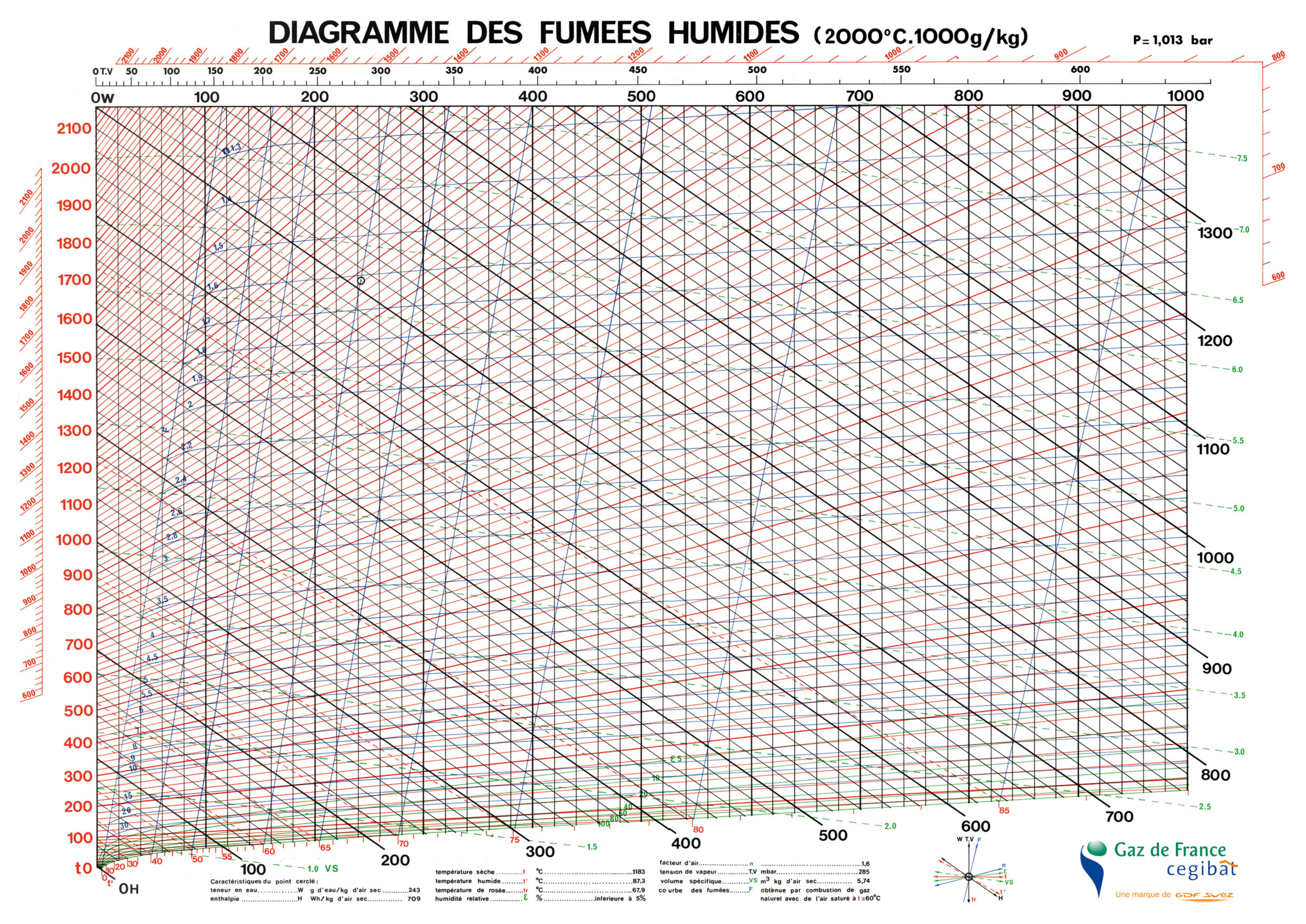


DIAGRAMME DES FUMEES HUMIDES (2000°C.1000g/kg)
P = 1,013 bar
0 T.V
0W
0H
t0
Caractéristiques du point cerclé :
teneur en eau .... W g d'eau/kg d'air sec 243
enthalpie .... H Wh/kg d'air sec 709
température sèche .... t °C 1183
température humide .... t' °C 87,3
température de rosée .... tr °C 67,9
humidité relative .... ε % .... inferieure à 5%
facteur d'air .... n 1,6
tension de vapeur .... T.V mbar 285
volume spécifique .... VS m³ kg d'air sec 5,74
courbe des fumées .... F obtenue par combustion de gaz naturel avec de l'air saturé à t = 60°C
Gaz de France
cegibat
Une marque de GDF SUEZ

OUTIL

Diagrammes des fumées humides

Courbes et mode d'emploi



Sommaire

Présentation

La plupart des diagrammes de l'air humide disponibles à l'heure actuelle ont été conçus pour la climatisation ; aussi, rares sont ceux dépassant 60 °C en température sèche et pouvant servir à l'étude des processus industriels de séchage.

De plus, on sait que les niveaux de température dans les séchoirs varient considérablement d'un secteur à l'autre (120 °C pour les tuiles, 900 °C pour la luzerne, 180 °C pour le lait, etc.) et que, sur certains séchoirs, l'utilisation d'un recyclage peut conduire à des vapeurs particulièrement élevées en teneur en eau. Aussi, pour être en mesure, dans tous les cas, de travailler avec précision, convient-il en fait de disposer de plusieurs diagrammes couvrant diverses gammes bien adaptées de températures et de teneurs en eau.

Enfin, dans presque tous les domaines, le séchage en direct au gaz naturel est développé ; c'est pourquoi il apparaît préférable de pouvoir utiliser des diagrammes dits des fumées humides, c'est-à-dire des diagrammes de l'air humide sur lesquels on représente, en plus, l'état des produits de la combustion obtenus avec du gaz naturel pour différents facteurs d'air.

Toutes ces considérations nous ont amenés à réaliser, à partir de moyens informatiques, les 4 diagrammes des fumées humides présentés ici qui couvrent les domaines suivants :

diagramme n°1 jusqu'à t = 150 °C et W = 100 g/kg
diagramme n°2 jusqu'à t = 300 °C et W = 190 g/kg
diagramme n°3 jusqu'à t = 1 000 °C et W = 500 g/kg
diagramme n°4 jusqu'à t = 2 000 °C et W = 1 000 g/kg

On trouvera, ci-joint, un exemplaire de chacun de ces 4 diagrammes, le présent document ayant pour objet d'en faciliter l'utilisation. Pour ce faire, après un rappel sur les principes généraux de l'air humide et une description des 4 diagrammes, nous insisterons surtout sur la façon de se servir des courbes et des échelles relatives aux fumées qui constituent bien sûr l'aspect original de ces derniers.

1 ✦ Principes

1.1 • LES DIAGRAMMES DE L'AIR HUMIDE

L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau pour lequel :

- on admet que les conditions de température et de pression sont telles qu'il se conduit comme un gaz parfait,
- on considère toujours 1 kg d'air sec auquel sont mélangés Wg d'eau.

Son état est donc connu par la valeur de 2 des 3 variables d'état P, V, t et par la valeur de W.

En général, on retient comme paramètres de base : la pression P, la température t et la teneur en eau W.

Si on considère, de plus, la pression comme constante et égale à la pression atmosphérique,

$P = P_0 = 1{,}013$ bar,

l'état de l'air humide se trouve alors parfaitement caractérisé par la connaissance de t et W. À partir de ces deux paramètres, on peut déterminer d'autres paramètres utiles, indépendants, tels que l'humidité relative ε, l'enthalpie H, le volume spécifique Vs, la température humide t', etc., ou dépendant uniquement de la teneur en eau W, comme la température de rosée tr et la pression partielle de vapeur d'eau ou tension de vapeur Tv. En fait, l'état de l'air humide peut être défini par 2 paramètres indépendants quelconques, d'où le rôle du diagramme de l'air humide.

Celui-ci se compose en effet de plusieurs réseaux entrecroisés de courbes d'égale valeur des divers paramètres retenus. À l'intersection des 2 courbes, d'égale valeur, correspondant aux 2 paramètres connus, se trouve le point représentatif de l'état considéré. Il suffit ensuite de déterminer, pour tous les autres réseaux, sur quelles courbes d'égale valeur ce point se trouve placé, pour obtenir ainsi la valeur de tous les autres paramètres.

1.2 • LES PARAMÈTRES DE L'AIR HUMIDE

• La température sèche t

• La teneur en eau W

La teneur en eau représente la masse de vapeur d'eau associée à un kilogramme d'air sec.

• L'enthalpie H

L'enthalpie de l'air humide a pour origine l'air sec à 0 °C et l'eau, à l'état liquide, à 0 °C. L'enthalpie de l'air humide est la somme des chaleurs sensibles (de l'air et de la vapeur d'eau) et de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Avec les produits de combustion, on mesurera donc de l'énergie PCS.

• La température humide t'

La température humide est, en première approximation, la température indiquée par le thermomètre humide, et plus rigoureusement, c'est la température d'un air humide porté adiabatiquement à saturation par évaporation d'eau à cette température.

• Le volume spécifique Vs

Le volume spécifique, ou volume massique spécifique, est le volume occupé par l'air humide contenant 1 kg d'air sec.

• L'humidité relative ε

L'humidité relative est le rapport de la tension de vapeur d'eau à la tension de vapeur saturante, à la même température.

• La température de rosée tr

La température de rosée est la température à laquelle il faut refroidir, à teneur en eau constante, l'air humide pour le porter à saturation.

• La tension de vapeur Tv

La tension de vapeur est le produit de la pression totale par le rapport du nombre de moles de vapeur d'eau au nombre de moles total (tire molaire) ; pour un gaz parfait comme l'air humide, c'est donc aussi la pression partielle de vapeur d'eau.

Remarques :

1) La pression, on l'a vu, n'est pas un paramètre. Elle est fixée à 1,013 bar, valeur de la pression normale atmosphérique.
2) Les diagrammes de l'air humide peuvent se classer en 2 grandes familles selon les paramètres retenus sur les axes permettant de construire les autres réseaux :
   - diagrammes de MOLLIER établis en H et W,
   - diagrammes de CARRIER établis en t et W.

1.3 • LA REPRÉSENTATION DES PRODUITS DE COMBUSTION

Par la combustion de gaz naturel avec un air humide dont l'état est connu et caractérisé par : ta, Wa, Ha..., on obtient, suivant la valeur des facteurs d'air, ni, utilisés, divers états des fumées humides de caractéristiques : Tfi, Wfi, Hfi..., pour lesquels on a :

- Hfi > Ha, la différence Hfi - Ha représentant l'énergie PCS apportée par le gaz naturel,
- Wfi > Wa, en raison de l'eau apportée par la combustion.

En outre, dans un diagramme en H et W, tous les points représentatifs (Hfi, Wfi) sont alignés avec le point repésentatif de l'air comburant (Ha, Wa), car la quantité d'eau apportée par la combustion est proportionnelle à l'énergie fournie. La représentation des produits de la combustion pourra donc, dans un tel diagramme, s'effectuer à l'aide de deux séries de courbes : les droites des fumées sur lesquelles se placent les points représentatifs des produits de la combustion obtenus à partir de l'air comburant donné et les courbes d'isofacteurs d'air.

D'autre part, la composition des fumées sèches diffère quelque peu de celle de l'air sec, par la présence de CO_2, l'assimilation n'étant légitime, eu égard, à la précision des diagrammes que pour des facteurs d'air suffisamment grands. Dans le cas contraire, les relations entre les différents paramètres indépendants et, en particulier, celles entre H, W et t diffèrent de celles obtenues avec de l'air sec et il convient de disposer, en plus, d'échelles correctrices appropriées.

2 ✦ Description

2.1 • CONCEPTION DES 4 DIAGRAMMES

Pour les 4 diagrammes des fumées humides présentés ici, les paramètres de base sont W et H (diagramme dit de MOLLIER - RAMZINE). En effet, ce sont les deux paramètres extensifs et, sur un tel diagramme, le mélange des deux airs humides se trouve être représenté par le bary-centre géométrique de leur point représentatif.

La teneur en eau W est portée en abscisse et l'enthalpie H en ordonnée. Les axes font entre eux un angle α, variable suivant les diagrammes, afin d'assurer la meilleure représentation possible (*Figure 1*).

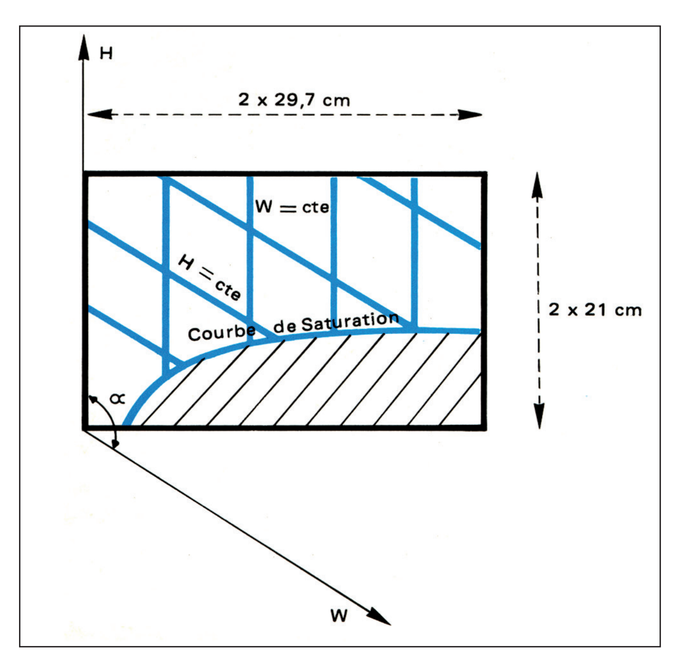


Diagramme	150 °C	300 °C	1000 °C	2000 °C
α	135 °C	135 °C	125 °C	125 °C

Fig. 1 - Conception des diagrammes

Les unités sont celles habituellement utilisées dans les diagrammes de l'air humide, exception faite de l'enthalpie H pour laquelle on a retenu le Wh/kg d'air sec (au lieu du kj/kg d'air sec habituellement utilisé), afin d'être homogène avec l'unité utilisée à GDF SUEZ. On a ainsi :

- la teneur en eau W en g d'eau/kg d'air sec,
- les températures sèche t, humide t' et de rosée tr en °C,
- le volume massique spécifique Vs en m^3/kg d'air sec,
- la tension de vapeur Tv en mbar.

Ces diagrammes ont été réalisés à partir d'un programme informatique prenant en compte les équations de base définissant les divers paramètres et intégrant les variations des chaleurs massiques des constituants avec la température pour le calcul des enthalpies.

2.2 • LES DIFFÉRENTES COURBES REPRÉSENTÉES

Les diagrammes comportent plusieurs réseaux de courbes groupées en 4 couleurs : noir, rouge, vert et bleu.

Les courbes noires : elles concernent les 2 variables de base H et W. Les isenthalpes H sont donc inclinées suivant l'angle α du diagramme et les isoteneurs en eau W tracées verticalement. De plus, une échelle située en haut du diagramme matérialise les droites d'égale tension de vapeur Tv.

Les courbes rouges : elles concernent les variables liées à la température : t et t'. Les températures sèches t sont tracées en trait plein, et les températures humides t' en pointillés. En outre, les températures de rosée tr sont matérialisées sur la courbe de saturation.

De plus, sur les diagrammes à 1 000 et 2 000 °C, nous avons tracé en haut et sur les côtés une échelle de température concernant les fumées stœchiométriques dont l'utilisation sera précisée plus loin.

Les courbes vertes : elles concernent l'humidité relative et le volume massique spécifique Vs. Les premières sont en trait plein, les secondes en trait pointillé.

Les courbes bleues : elles comprennent 2 séries de courbes concernant la combustion :

- les courbes F dites des fumées (qui sont des droites),
- les courbes n d'égal facteur d'air.

L'origine des courbes F correspond à de l'air saturé en vapeur d'eau à une température donnée.

3 ✦ Utilisation

Nous nous intéresserons essentiellement ici aux courbes bleues de combustion et à la correction due à la composition des fumées, en considérant l'utilisation des courbes usuelles du diagramme de l'air humide comme connue.
Cette utilisation est d'ailleurs rappelée par une rosace et un exemple sur chacun des diagrammes.

3.1 - LES COURBES DES FUMÉES ET LES ISOFACTEURS D'AIR

Les diagrammes permettent d'obtenir l'état des produits de la combustion du gaz naturel quel que soit l'état de l'air comburant utilisé.

3.11 ✦ Combustion de gaz naturel et d'air saturé *(Figure 2)*

Soit A1 le point représentatif de l'état de l'air saturé, celui correspondant à l'état des produits de la combustion peut être déterminé de deux façons :

a) Connaissant un paramètre caractéristique par exemple, la température sèche t1.

On trace une droite passant par A1 et parallèle à la droite des fumées la plus proche et on la prolonge jusqu'à l'intersection avec l'isotherme t1. On obtient ainsi le point représentatif des fumées C1, et on lit le facteur d'air correspondant n_1.

b) Connaissant le facteur d'air n_1.

On trace une droite passant par A1 et parallèle à la droite des fumées la plus proche, on la prolonge jusqu'à l'intersection avec la courbe d'isofacteur d'air n_1. On obtient ainsi le point représentatif des fumées C1.

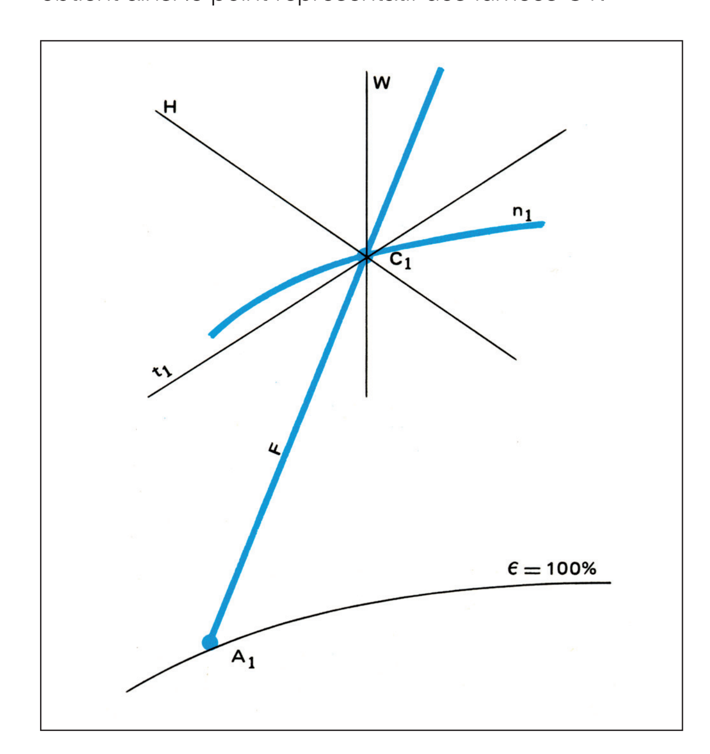


Fig. 2 - Exemple d'utilisation des courbes bleues de combustion avec de l'air comburant saturé

3.12 ✦ Combustion de gaz naturel et d'air non saturé *(Figure 3)*

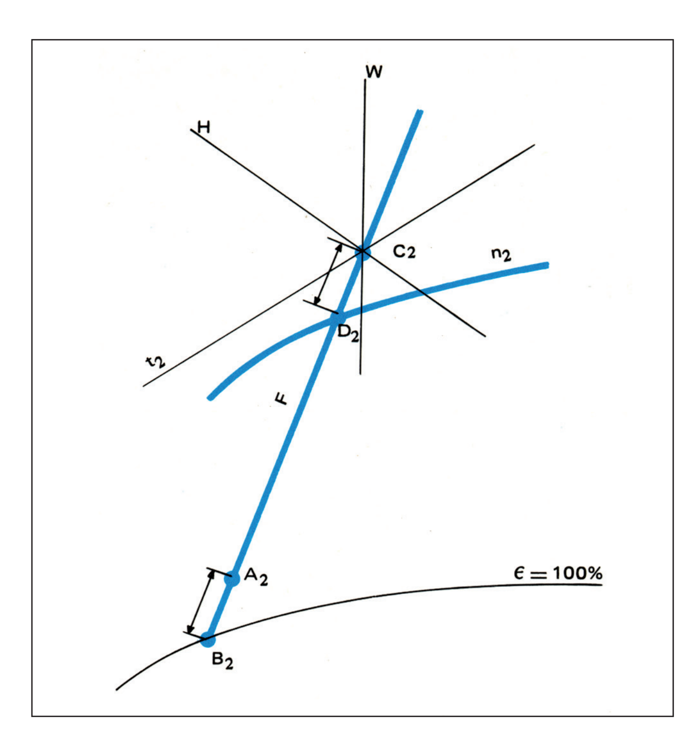


Fig. 3 - Exemple d'utilisation des courbes bleues de combustion avec de l'air comburant non saturé

Soit A2 le point représentatif de l'état de l'air non saturé. On trace une droite passant par A2 et parallèle à la droite des fumées la plus proche que l'on prolonge jusqu'à la courbe de saturation.

Soit B2 le point ainsi obtenu. Celui correspondant à l'état des produits de la combustion peut alors être déterminé de deux façons :

a) Connaissant un paramètre caractéristique des fumées, par exemple, la température sèche t2.

On suit la droite passant par A2 et B2 jusqu'à l'intersection avec l'isotherme t2 des fumées. On obtient ainsi le point représentatif C2. Pour déterminer le facteur d'air réel, il faut prendre la mesure du segment A2-B2, et la reporter en dessous de C2, on obtient ainsi le point D2 sur lequel on lit le facteur d'air cherché n_2.

b) Connaissant le facteur d'air n_2.

On suit la droite passant par A2 et B2 jusqu'à l'intersection avec la courbe d'isofacteur d'air n_2. On obtient ainsi, cette fois, directement le point D2. Mais pour trouver le point représentatif de l'état des produits de la combustion, il faut alors reporter la mesure du segment

A2-B2 au-dessus de D2, ce qui permet d'obtenir le point C2.

Par exemple, le point cerclé noir sur le diagramme 300 °C, 190 g/kg, point C2, serait représentatif de l'état des produits de la combustion de gaz naturel avec de l'air à 50 °C et 58 % d'humidité relative (point A2), le facteur d'air étant égal à 16 (point D2).

3.2 - LES CORRECTIONS DUES À LA COMPOSITION DES FUMÉES

3.21 ✦ Principe

La différence de composition entre les produits de la combustion et l'air affecte la valeur de tous les paramètres, c'est-à-dire que pour un point représentatif des fumées correctement situé sur le diagramme, en H et W, les valeurs des paramètres correspondant t, t', Vs, ε, etc. seront différentes de celles obtenues pour de l'air ayant même point représentatif en H et W.

Dans les diagrammes des fumées humides présentés ici, on n'a fait porter la correction que sur la température sèche t.

Aussi ne prendra-t-on en considération, dans cette partie, que les 3 paramètres H, W et t. De plus, eu égard à la précision des diagrammes, la correction ne devient sensible qu'à partir de 400-500 °C pour des fumées stœchiométriques et qu'à partir de températures encore plus élevées pour des fumées obtenues par des combustions en plus grand excès d'air.

Cette correction n'est évidemment à prendre en compte que si l'on désire effectuer des calculs précis, à haute température, à l'aide de ces diagrammes. Elle s'effectue pour deux diagrammes (n° 3 : 1 000 °C - 500 g/kg et n° 4 : 2 000 °C - 1 000 g/kg) à l'aide d'une échelle matérialisant les isothermes des fumées stœchiométriques qui est située en haut et sur les côtés de ces diagrammes.

Deux cas sont distingués :

a) pour des fumées issues de combustions stœchiométriques (n = 1), la correction de température se lira directement sur l'échelle des isothermes des fumées stœchiométriques,

b) pour les fumées issues de combustion en excès d'air (n > 1), la correction de température se fera par interpolation entre la température lue sur l'échelle des isothermes des fumées stoéchiométriques et la température lue sur les isothermes du diagramme (ce qui correspond à une assimilation des fumées à de l'air).

Dans tous les cas, on suppose connu le facteur d'air n caractérisant la composition des fumées, ainsi que 2 des 3 paramètres (H, W et t) et on s'efforce de déterminer le troisième.

Enfin, notons qu'au-delà de 1 500 °C, la valeur obtenue pour la température devient assez imprécise car on ne prend pas en compte la décomposition des fumées.

3.22 ✦ Correction de température pour des fumées issues de combustions stœchiométriques (n = 1) *(Figure 4)*

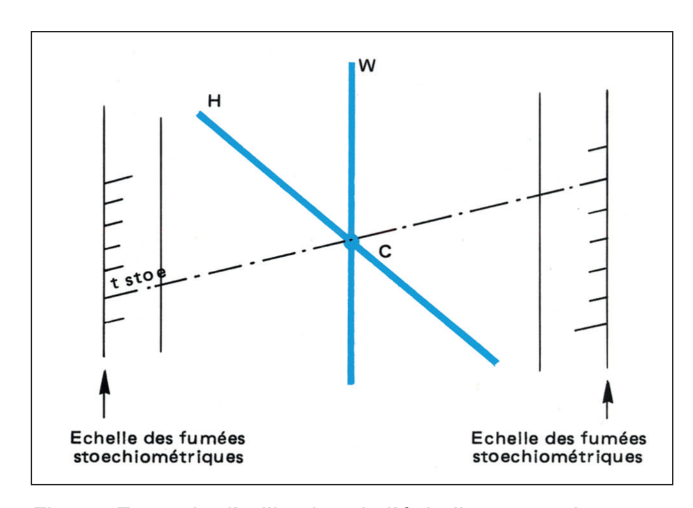


Fig. 4 - Exemple d'utilisation de l'échelle correctrice de composition pour des fumées obtenues par combustion stœchiométrique avec H et W connus.

a) L'enthalpie H et la teneur en eau W sont connues : on cherche la température sèche t.

Soit C le point représentatif des fumées stœchiométriques positionné d'après H et W dans le diagramme. Pour lire la température réelle, il suffit de déterminer l'isotherme de l'échelle des fumées stœchiométriques passant par C.

b) La teneur en eau W et la température sèche t sont connues : on cherche l'enthalpie H.

Pour positionner le point représentatif C et t et W, on suit l'isotherme de l'échelle des fumées stœchiométriques, correspondant à la température sèche t, jusqu'à l'intersection avec la droite d'isoteneur en eau W, la lecture de l'enthalpie H se faisant directement sur le diagramme.

c) L'enthalpie H et la température sèche t sont connues : on cherche la teneur en eau W.

Pour positionner le point représentatif C, en H et t, on suit l'isotherme de l'échelle des fumées stœchiométriques correspondant à la température sèche t, jusqu'à l'intersection avec l'isenthalpe H, la lecture de la teneur en eau W se faisant directement sur le diagramme.

3.23 ✦ Correction de température pour des fumées issues de combustions en excès d'air

Le facteur n est connu et supérieur à 1.

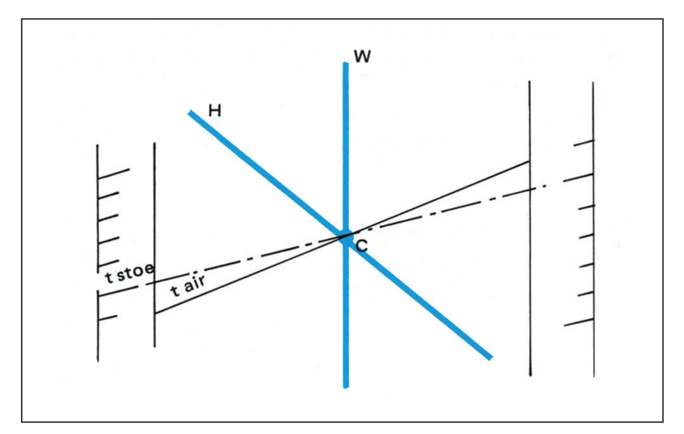


Fig. 5 - Exemple d'utilisation de l'échelle correctrice de composition pour des fumées obtenues par combustion en excès d'air avec H et W connus.

a) L'enthalpie H et la teneur en eau W sont connues : on cherche la température sèche t *(Figure 5)*.

On porte le point représentatif C dans le diagramme en le positionnant par H et W. On lit la température sèche du point C assimilé à de l'air, soit : t_{air}. On cherche ensuite l'isotherme de l'échelle des fumées stœchiométriques passant par C, soit $t_{stœ}$ (on a bien sûr $t_{stœ} \neq t_{air}$).

Pour connaître la température sèche exacte t, du point représentatif C, il suffit d'effectuer l'interpolation suivante entre les 2 températures t_{air} et $t_{stœ}$:

$$t = t_{air} + (t_{stœ} - t_{air})\,\frac{1}{n}$$

b) La teneur en eau W et la température sèche t sont connues : on cherche l'enthalpie H *(Figure 6)*.

On porte le point C' obtenu à l'intersection de la droite d'isoteneur en eau W et de l'isotherme $t = t_{stœ}$ de l'échelle des fumées stœchiométriques. Ensuite, on porte le point C" obtenu à l'intersection de l'isoteneur en eau W et de l'isotherme $t = t_{air}$ du diagramme.

Pour connaître la valeur exacte de l'enthalpie H : on effectue l'interpolation suivante entre les 2 enthalpies $H_{C'}$ et $H_{C''}$:

$$H = H_{C''} + (H_{C'} - H_{C''})\,\frac{1}{n}$$

ce qui permet de positionner par H et W le point représentatif véritable C.

c) L'enthalpie H et la température sèche t sont connues : on cherche la teneur en eau W *(Figure 7)*.

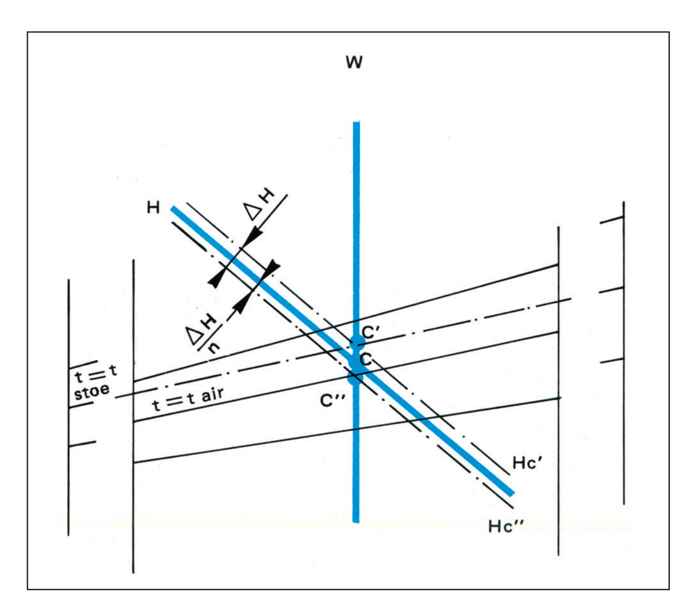


Fig. 6 - Exemple d'utilisation de l'échelle correctrice de composition pour des fumées obtenues par combustion en excès d'air avec t et W connus.

On porte le point C' obtenu à l'intersection de l'isenthalpe H et de l'isotherme $t = t_{stœ}$ de l'échelle des fumées stœchiométriques. Ensuite, on porte le point C" obtenu à l'intersection de l'isenthalpe H et de l'isotherme $t = t_{air}$ du diagramme.

Pour connaître la valeur exacte de la teneur en eau W : on effectue l'interpolation suivante entre les 2 teneurs en eau $W_{C'}$ et $W_{C''}$:

$$W = W_{C''} - (W_{C''} - W_{C'})\,\frac{1}{n}$$

ce qui permet par H et W de positionner le point représentatif véritable C.

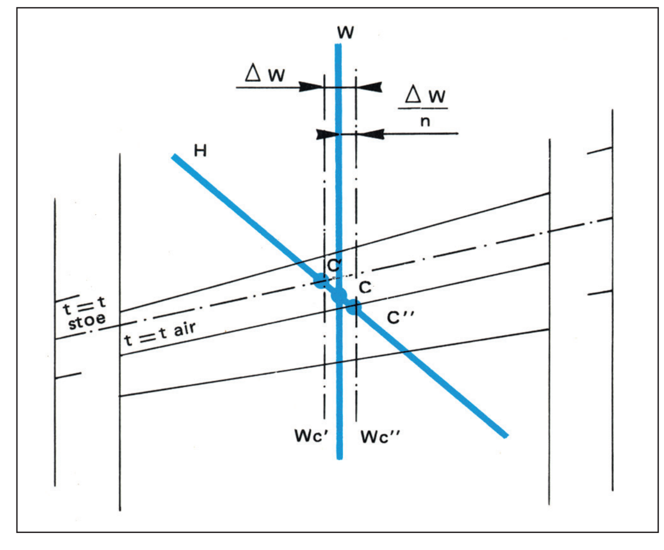


Fig. 7 – Exemple d'utilisation de l'échelle correctrice de composition pour des fumées obtenues par combustion en excès d'air avec H et t connus.

Remerciements à :
Joël Grégoire et Christian Lecras

GAZ DE FRANCE CEGIBAT

L'information-conseil
pour les professionnels du bâtiment

155 boulevard Victor Hugo
BP 163
93400 Saint-Ouen

téléphone 01 47 54 75 75
télécopie 01 47 54 73 97

www.cegibat.fr

GDF SUEZ - SA au capital de 2 259 627 708 € - 542 107 651 RCS Paris
Siège social : 16-26 rue du Docteur Lancereaux, 75008 PARIS.
Réf. : **2CBT0110** - Dépôt légal : juillet 2010 - ISBN 978-2-915466-80-5

Photographie de couverture : Dimitri Berteau
Création et exécution : Biceps.